МАШИНОСТРОЕНИЕ И МАШИНОВЕДЕНИЕ
MACHINE BUILDING AND MACHINE SCIENCE





УДК 620.179.17
https://doi.org/10.23947/2687-1653-2022-22-4-331-337

Научная статья



Акустико-эмиссионный способ диагностики конструкций из композиционных материалов на основе инвариантов



А. В. Попов, В. Ю. Волошина, К. А. Журавский, М. А. Лабина
Военный учебно-научный центр Военно-воздушных сил «Военно-воздушная академия имени профессора Н. Е. Жуковского и Ю. А. Гагарина», Российская Федерация, г. Воронеж, ул. Старых Большевиков, 54 а
avpnil@rambler.ru

Аннотация
Введение. Композиционные материалы являются основным способом уменьшения массы конструкции летательного аппарата и повышения его летно-технических характеристик. Методы неразрушающего контроля позволяют оценить техническое состояние композиционных материалов, а также определить концентраторы напряжений в них с целью принятия решения о дальнейшей эксплуатации данного объекта контроля. В работе представлен анализ применения композиционных материалов в конструкции летательных аппаратов и способы повышения их летно-технических характеристик за счет применения композитов. Описан акустико-эмиссионный способ оценки трещиностойкости на основе инвариантов. Целью исследования являлось повышение точности и оперативности оценки трещиностойкости конструкций летательных аппаратов из композиционных материалов за счет применения акустико-эмиссионного метода неразрушающего контроля.
Материалы и методы. Приведена номенклатура применяемых композиционных материалов в летательных аппаратах и произведено сравнение их физико-механических свойств. Использован акустико-эмиссионный метод неразрушающего контроля композиционных материалов на основе инвариантных соотношений.
Результаты исследования. Разработан способ оценки трещиностойкости силовых элементов конструкций на основе инвариантов акустико-эмиссионных процессов и программно-аппаратный комплекс на его основе.
Обсуждение и заключения. Полученные результаты могут быть использованы при определении прочностных характеристик композиционных материалов акустико-эмиссионным методом неразрушающего контроля для проведения оценки технического состояния силовых элементов конструкций в машиностроении, судостроении и авиастроении. Статья рекомендована научным сотрудникам, занимающимся разработкой летательных аппаратов.

Ключевые слова: композиционные материалы, летательный аппарат, неразрушающий контроль, акустико-эмиссионный контроль.

Благодарности. Исследования выполнены при поддержке программы «УМНИК» Российского Фонда содействия инновациям.

Для цитирования. Акустико-эмиссионный способ диагностики конструкций из композиционных материалов на основе инвариантов / А. В. Попов, В. Ю. Волошина, К. А. Журавский, М. А. Лабина // Advanced Engineering Research. — 2022. — Т. 22, № 4. — С. 331–337. https://doi.org/10.23947/2687-1653-2022-22-4-331-337

Original article

Acoustic Emission Method of Diagnostics of Structures Made of Composite Materials Based on Invariants

Alexey V. Popov ✉, **Valentina Yu. Voloshina**, **Konstantin A. Zhuravsky**, **Maria A. Labina**

Military Educational and Scientific Center of the Air Force "N.E. Zhukovsky and Y.A. Gagarin Air Force Academy", 54a, Starykh Bol'shevikov St., Voronezh, Russian Federation

✉ avpnil@rambler.ru

Abstract

Introduction. Composite materials are the main way to reduce the weight of the aircraft structure and improve its flight performance. Methods of non-destructive testing enable to assess the technical condition of composite materials, as well as to determine stress concentrators in them to make a decision on the further operation of this control object. The paper presents an analysis of the use of composite materials in the aircraft design and ways to improve their flight performance through the application of composites. An acoustic-emission method for assessing crack resistance based on invariants was described. The study aimed at increasing the accuracy and efficiency of assessing the crack resistance of aircraft structures made of composite materials through the use of the acoustic emission method of non-destructive testing.

Materials and Methods. The nomenclature of composite materials used in aircraft was given, and their physical and mechanical properties were compared. The acoustic emission method of non-destructive testing of composite materials based on invariant ratios was used.

Results. A method for assessing the crack resistance of primary structural elements based on the invariants of acoustic emission processes, and a program apparatus complex based on it has been developed.

Discussion and Conclusions**.** The results obtained can be used to determine the strength characteristics of composite materials by the acoustic emission method of non-destructive testing to assess the technical condition of primary structural elements in mechanical engineering, shipbuilding, and aircraft construction. The paper is recommended to researchers involved in the development of aircraft.

Keywords: composite materials, aircraft, non-destructive testing, acoustic emission control.

Acknowledgments. The research was carried out with the support of the "UMNIK" program of the Russian Foundation for the Promotion of Innovation.

For citation. A. V. Popov, V. Yu. Voloshina, K. A. Zhuravsky, M. A. Labina. Acoustic Emission Method of Diagnostics of Structures Made of Composite Materials Based on Invariants. Advanced Engineering Research, 2022, vol. 22, no. 4, pp. 331–337. https://doi.org/10.23947/2687-1653-2022-22-4-331-337

Введение. Повышение летно-технических характеристик (ЛТХ) и снижение веса конструкций летательных аппаратов при сохранении их достаточной прочности и жесткости является основополагающей задачей в авиастроительной области [1, 2]. Внедрение композиционных материалов (КМ) частично позволяет решить данную задачу.

Разработчики летательных аппаратов (ЛА) постоянно внедряют в авиационную технику новые материалы для повышения ЛТХ и снижения массы конструкции. КМ позволяют снизить массу крыла, фюзеляжа и оперения. Высокие физико-механические свойства КМ повышают жесткость и прочность конструкции.

К основным преимуществам КМ относят высокие значения удельной прочности, жёсткости (модуль упругости 130–140 ГПа), износостойкости и усталостной прочности[1, 2] [3, 4]. К недостаткам КМ относят гигроскопичность, значительную стоимость, анизотропию свойств, низкую ударную вязкость, низкую эксплуатационную технологичность.

Целью исследования являлось повышение точности и оперативности оценки трещиностойкости конструкций из композиционных материалов за счет применения акустико-эмиссионного (АЭ) контроля.

Материалы и методы. В авиастроении применяется широкий спектр КМ [1, 4] (рис. 1), за счёт которых можно облегчать вес конструкций. Это достигается путем замены элементов, выполненных из традиционных материалов (сплавы титана и алюминия, стали), на КМ.

[1] Правила организации и проведения акустико-эмиссионного контроля сосудов, аппаратов, котлов и технологических трубопроводов. ПБ 03–593–03 / Гостехнадзор России. М.: ПИО ОБТ. 2003. 102 с. // files.stroyinf.ru : [сайт]. URL: https://files.stroyinf.ru/Data2/1/4294816/4294816759.htm (дата обращения : 28.09.2022)..

[2] Иванов В. И., Власов И. Э. Метод акустической эмиссии // Неразрушающий контроль. Справочник в 8т. Т 7. Кн.1. / Под общ. ред. В. В. Клюева. М : Машиностроение. 2006. 340 с.

Перед предприятиями авиационной промышленности стоят две важные задачи:

– оценить процессы накопления повреждений и разрушений конструкций из КМ во всем диапазоне знакопеременных нагрузок;

– оценить качество серийной продукции из КМ путем проведения прочностных испытаний.

В основном выделяют следующие схемы разрушения КМ (рис. 1):

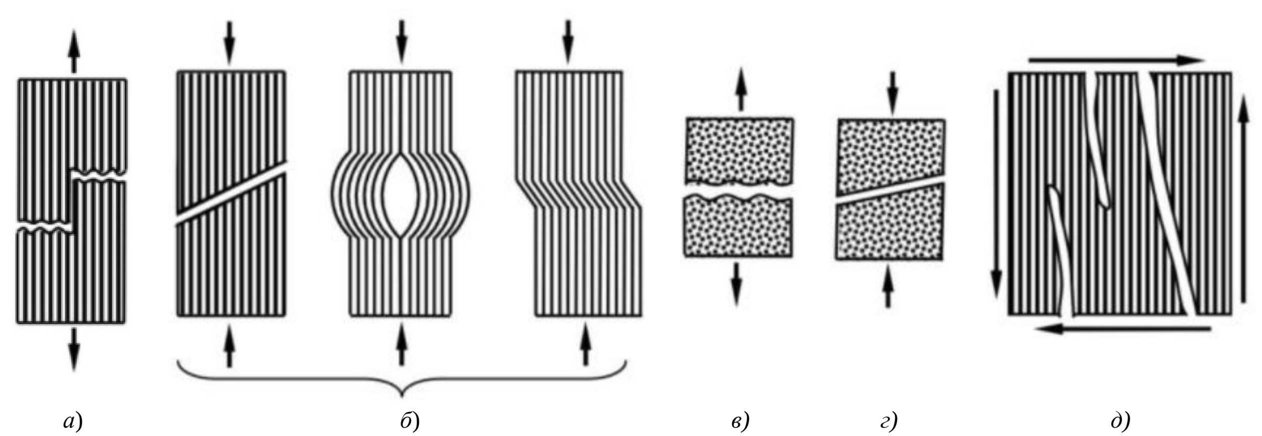


Рис. 1. Схемы разрушения композиционных материалов: *а* — при растяжении вдоль волокон; *б* — при сжатии вдоль волокон; *в* — при растяжении поперёк волокон; *г* — вызванное сдвиговыми напряжениями при сжатии поперек волокон; *д* — расслоение материала, вызванное сдвиговыми напряжениями (рисунок авторов)

В настоящее время особое место среди методов диагностирования конструкций ответственного назначения занимает акустико-эмиссионный (АЭ) метод НК.

Метод АЭ основан на регистрации акустических волн, излучаемых при разрушении КМ. К основным преимуществам данного метода относят [5–11]:

– комплексный характер исследования КМ (механика разрушения и акустическая диагностика);

– регистрация развивающихся дефектов КМ;

– высокая чувствительность к растущим дефектам КМ (чувствительность АЭ аппаратуры порядка 1×10^{-6} мм^2 для трещины КМ протяженностью 1 мкм);

– использование нескольких преобразователей;

– дистанционный контроль объектов при значительном удалении от АЭ аппаратуры.

АЭ в КМ представляет собой нестационарный случайный процесс излучения упругих волн. Исходя из этого, для обработки и анализа таких процессов могут применяться методы статической радиотехники. На основе пуассоновского распределения выполняется известное равенство между математическим ожиданием и дисперсией количества событий в случайном процессе:

$$m[x] = D[x] = \lambda, \tag{1}$$

где λ — интенсивность числа импульсов на заданном интервале выборки.

Это соотношение позволяет построить параметрические инварианты, справедливые только для пуассоновского процесса, и на этой основе оценить отклонение анализируемого процесса от пуассоновского [5, 6, 12, 13]:

$$I_1 = (m[x^3] - 3 \cdot m[x^2] \cdot m[x] + (m[x])^3) - m[x] = 0. \tag{2}$$

Выражение (15) может использоваться как инвариант количества импульсов АЭ для определения степени отклонения потока АЭ импульсов от пуассоновского при проведении АЭ испытаний КМ.

На основании (15) получим еще несколько выражений для определения степени отклонения потока импульсов АЭ от пуассоновского:

$$I_2 = \frac{m[x]}{m[x^3]} = 1; \tag{3}$$

$$I_3 = \frac{m[x]\left(1-2\cdot\left(m[x]^2\right)+3\cdot m[x^2]\right)}{m[x^3]} = 1. \tag{4}$$

При образовании макродефекта характеристики потоков импульсов АЭ становятся зависимыми, что разрушает гипотезу пуассоновского потока и приводит к нарушению равенств (2–4).

Данный подход реализован в программно-аппаратном комплексе (ПАК) (рис. 2), который позволяет идентифицировать трещиноподобные дефекты в различных КМ [12, 13].

ПАК состоит из следующих компонентов:

– широкополосные пьезодатчики GT300, рабочий диапазон частот —100–800 кГц, резонансная частота 283 кГц;

– усилитель GT200A, коэффициент усиления — 1–200, пределы допускаемой дополнительной относительной погрешности коэффициента преобразования по заряду в рабочем диапазоне температур составляют от –40 °до + 85 °С с погрешностью ± 1 %;

– АЦП Е20-10 — быстродействующий модуль АЦП с наличием USB интерфейса для подключения к ПК, который имеет 4 канала АЦП 14 бит/10 МГц с функцией мультиплексирования, 16 каналов цифрового ввода и вывода, совместимые с TTL логикой, а также 2 канала ЦАП 12 бит/ ±5 В;

– ПЭВМ, ВЧ кабели.

Точность и достоверность регистрации и обработки АЭ обеспечивается частотными параметрами пьезодатчиков и АЦП, которые согласуются с теоремой Котельникова, которая гласит о том, что непрерывный сигнал с ограниченным спектром можно точно восстановить по его дискретным отсчётам, если они были взяты с частотой дискретизации, превышающей максимальную частоту сигнала минимум в два раза.

В ПАК используется программная амплитудная пороговая фильтрация, а также способ сглаживания резонансной амплитуды затухания импульсов на основе цифрового пикового детектора, позволяющий получить экспоненциальное сглаживание формы импульсов АЭ для повышения точности их регистрации.

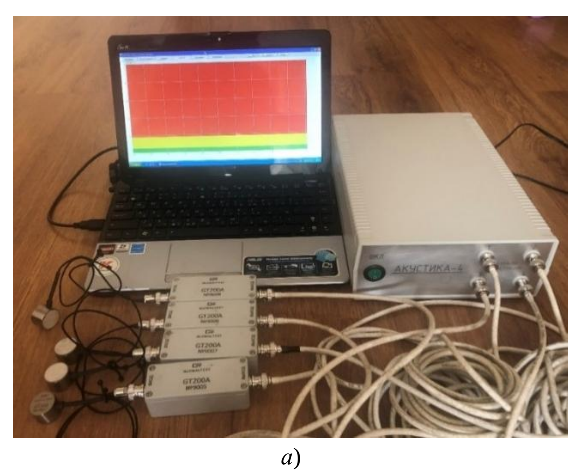
Для комплексного анализа в реальном масштабе времени множества информативных параметров сигналов АЭ разработана методика оценки многопараметрической информации, основанная на объединении («свёртки») информативных параметров АЭ методами теории исследования операций.

Разработанная программная реализация методики имеет следующие основные функциональные режимы: настройка, проверка функционирования, ввод ограничений и исходных данных, наблюдение за изменением нагрузок, деформаций и осциллограмм импульсов АЭ, комплекс информативных параметров АЭ и их «свёртки» по каналам регистрации, определение местоположения дефектов, оценка опасности дефектов и возможности дальнейшей эксплуатации конструкции, хранение результатов.

Так как АЭ является пассивным методом неразрушающего контроля, один пьезодатчик может регистрировать сигналы с отдельного силового элемента ЛА (рис. 2 *б*).

От материала, профиля и толщины испытуемых образцов зависит затухание упругих волн, что определяет количество используемых пьезопреобразователей и расстояние между ними. Затухание сигналов определяется опытным путём при помощи имитатора АЭ сигналов перед проведением испытаний образцов и элементов конструкций.

Для локализации дефектов за основу был взят триангуляционный метод [3,4], что позволяет определять в силовых элементах конструкций местоположение дефектов в реальном масштабе времени с точностью до 0,1 м.



а)



б)

Рис. 2. Программно-аппаратный комплекс акустико-эмиссионной диагностики: *а* — комплекс в сборе; *б* — размещение датчика комплекса при испытаниях элерона летательного аппарата на стенде (фото авторов)

Результаты исследования. Для оценки достоверности предложенного метода инвариантов и чувствительности ПАК к оценке развивающихся дефектов были проведены прочностные испытания серии образцов КМ КМУ-1В до разрушения. Нагрузка осуществлялась разрывной машиной РМ-1. Перед началом испытаний на растяжение до разрушения на поверхность образца устанавливался пьезоэлектрический датчик

[3] ПБ 03–593–03. Правила организации и проведения акустико-эмиссионного контроля сосудов, аппаратов, котлов и технологических трубопроводов / Гостехнадзор России. 2003. 102 с.

[4] Неразрушающий контроль: Справочник: В 8 т. / Под общ. ред. В. В. Клюева. Т. 7: В 2 кн. Кн. 1: В. И. Иванов, И. Э. Власов. Метод акустической эмиссии. Кн. 2: Ф. Я. Балицкий, А. В. Барков, Н. А. Баркова и др. Вибродиагностика. 2-е изд., испр. Москва : Машиностроение, 2006. 829 с.

через слой контактной смазки (Циатим) для улучшения акустического контакта. В ходе испытаний регистрировались акустические импульсы, возникающие в структуре ОК при создании нагрузки. Упругие волны АЭ регистрировались пъезодатчиком, затем сигнал усиливался предусилителем, аналого-цифровой преобразователь трансформировал сигнал в аналого-цифровой вид для последующей обработки на ПЭВМ. Результаты изображены на рис. 3:

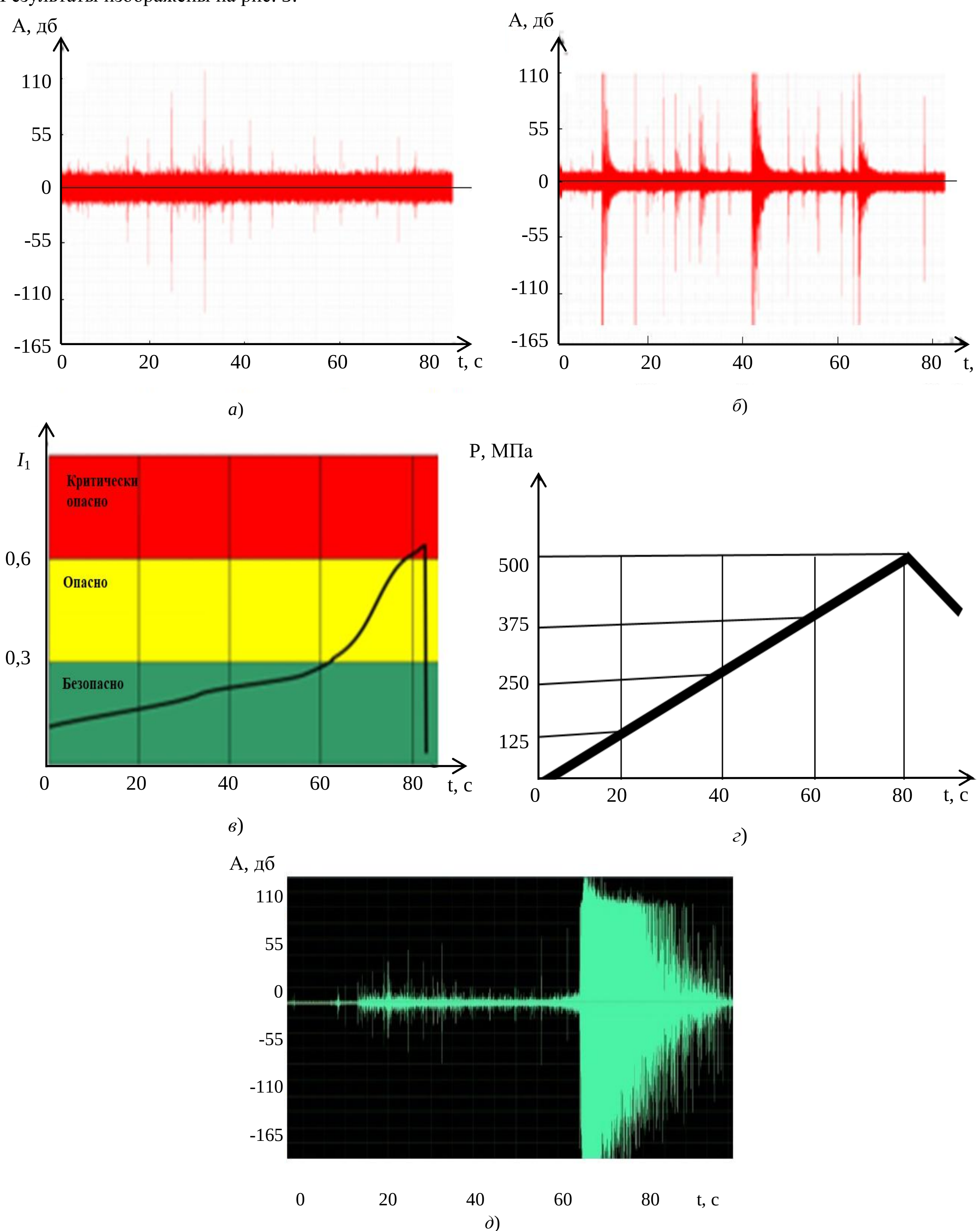


Рис. 3. Результаты проведения экспериментов до разрушения образцов:
а — осциллограмма импульсов АЭ при разрушении матрицы композиционного материала; *б* — осциллограмма импульсов АЭ при разрушении волокон композиционного материала; *в* — кривая инварианта I_1; *г* — кривая нагружения силового элемента планера из КМ; *д* — осциллограмма АЭ сигнала от начала нагрузки до разрушения образца (рисунок авторов)

На рис. 3 *а* и *б* представлены осциллограммы импульсов АЭ при разрушении матрицы и волокон композиционного материала, в которых максимальные значения амплитуды (А) АЭ сигнала соответствуют разрушению ОК. При значениях амплитуды 55 Дб происходит разрушение матрицы КМ, при 75 Дб — волокон КМ.

На рис. 3 *в* изображена зависимость инварианта от времени I_1 (нагрузки). Зеленая зона характеризуется отсутствием дефекта в силовом элементе планера. Желтая зона характеризуется неблагоприятной средой нагружения ОК, образованием развивающихся дефектов (трещин, расслоений). Красная зона соответствует разрушению КМУ-1В.

С 60 секунды нагружения при нагрузке 375 МПа происходит образование магистральной трещины (рис. 3 *г*), что приводит к выходу инварианта из зелёной (безопасной) зоны. Данные условия соответствуют 75 % разрушающей нагрузки (350 МПа) образцов. Достоверность применения инвариантов подтверждается резким увеличением амплитуды и интенсивности сигналов (рис. 3 *д*), результатами оптического контроля при испытаниях.

При нагрузке Р=500 МПа происходит разрушение КМ в момент времени равный Т=80 с, что вызывает уменьшение нагрузки и амплитуды акустических колебаний в материале ОК.

Обсуждение и заключения. Данный эксперимент отражает проведение акустико-эмиссионного контроля образцов (силовых элементов конструкций) из КМ КМУ-1В.

Разработанный ПАК на основе предложенного метода инвариантов позволяет оперативно (в реальном масштабе времени) обрабатывать многоканальную и многопараметрическую информацию об изменении информативных параметров АЭ и определять местоположение дефектов в КМ, оценивать степень опасности дефектов и возможность дальнейшей эксплуатации конструкций [12, 13].

В перспективе предлагается внедрение подобных автоматических систем контроля для осуществления диагностирования конструкции летательных аппаратов в полете и при наземном обслуживании.

Список литературы

1. Козлов, Д. М. Проектирование узлов авиационных конструкций / Д. М. Козлов; под. ред. В. А. Комарова. — Самара : Изд-во Самарского университета, 2017. — 96 с.

2. Гишваров, А. С. Анализ эксплуатационных разрушений летательных аппаратов и двигателей / Д. М. Козлов. — Уфа : УГАТУ, 2003. — 289 с.

3. Махутов, Н. А. Применение технической диагностики для расчета вероятности разрушения технических устройств и оценки риска аварии / Н. А. Махутов, В. И. Иванов, В. В. Мусатов // Безопасность труда в промышленности. — 2018. — № 9. — С. 53–64. 10.24000/0409-2961-2018-9-53-64

4. Андриевский, Р. Л. Наноструктурные материалы / Р. А. Андриевский, А. В. Рагуля. — Москва : Академия, 2005. — 192 с.

5. Буйло, С. И. Вероятностно-информационный подход к оценке достоверности результатов акустико-эмиссионного метода контроля и диагностики / С. И. Буйло, Б. И. Буйло, М. И. Чебаков // Дефектоскопия — 2021. — № 5. — С. 37–44.

6. Буйло, С. И. Об информативности метода инвариантов сигналов акустической эмиссии в задачах диагностики предразрушающего состояния материалов / С. И. Буйло // Дефектоскопия. — 2018. — № 4. — С. 18–23.

7. Zhang, F. Statistical Model and Analysis of AE Data from Aircraft / F. Zhang, G. Wu, Z. Wang // Insight: Non-Destructive Testing and Condition Monitoring. — 2001. — Vol. 43. — P. 531–536.

8. Zheng, G. T. Blind Deconvolution of Acoustic Emission Signals for Damage Identification in Composites / G. T. Zheng, M. Backley, G. Kister // AIAA Journal. — 2001. — Vol. 39. — P. 1198–1205. https://doi.org/10.2514/2.1435

9. Skalskyi, V. R. Some Methodological Aspects of Application of Acoustic Emission / V. R. Skalskyi, P. M. Koval // Lviv: Spolom; 2007. — 336 p.

10. Maochen Ge. Analysis of Source Location Algorithms, Part I: Overview and Non-Iterative Methods / Maochen Ge // Journal of Acoustic Emission. — 2003. — Vol. 21. — P. 14–28.

11. Barat, V. Detection of AE Signals against Background Friction / V. Barat, Y. Borodin, A. Kuzmin // Journal of Acoustic Emission. — 2011. — Vol. 29. — P. 133–141.

12. Методы и средства акустико-эмиссионной диагностики силовых элементов планера воздушных судов / А. В. Попов, А. Б. Комлев, А. О. Самуйлов, П. В. Закусилов // В мире неразрушающего контроля. — 2021. — Т. 24, № 2. — С. 50–52. 10.12737/1609-3178-2021-52-54

13. Попов, А. В. Акустико-эмиссионный способ диагностики силовых элементов планера воздушных судов на основе инвариантов / А. В. Попов, В. Ю. Волошина, А. О. Самуйлов // Вестник Уфимского государственного авиационного технического университета. — 2021. — Т. 25, № 3. — С. 50–55. 10.54708/19926502_2021_2539350

Поступила в редакцию 19.09.2022.
Поступила после рецензирования 20.10.2022.
Принята к публикации 20.10.2022.

Об авторах:

Попов Алексей Владимирович, профессор кафедры «Восстановление боевой авиационной техники» Военного учебно-научного центра Военно-воздушных сил «Военно-воздушная академия имени профессора Н. Е. Жуковского и Ю. А. Гагарина» (394956, РФ, г. Воронеж, ул. Старых Большевиков, 54 а), доктор технических наук, доцент, avpnil@rambler.ru, ORCID

Волошина Валентина Юрьевна, старший научный сотрудник Военного учебно-научного центра Военно-воздушных сил «Военно-воздушная академия имени профессора Н. Е. Жуковского и Ю. А. Гагарина» (394956, РФ, г. Воронеж, ул. Старых Большевиков, 54 а), кандидат экономических наук, tolkoradinauki@mail.ru, ORCID

Журавский Константин Александрович, адъюнкт кафедры «Восстановление боевой авиационной техники» Военного учебно-научного центра Военно-воздушных сил «Военно-воздушная академия имени профессора Н. Е. Жуковского и Ю. А. Гагарина» (394956, РФ, г. Воронеж, ул. Старых Большевиков, 54 а), tolkoradinauki@mail.ru, ORCID

Лабина Мария Алексеевна, инженер ООО «Синтез технологий», (394956, РФ, г. Воронеж, ул. Старых Большевиков, 54 а), Labina1310@rambler.ru, ORCID

Заявленный вклад соавторов:

А. В. Попов — разработка метода инвариантов, научное руководство исследованиями. В. Ю. Волошина — проведение и анализ результатов исследований, оформление статьи. К. А. Журавский — разработка и описание программно-аппаратного комплекса. М. А. Лабина — анализ композиционных материалов и летно-технических характеристик летательных аппаратов.

Конфликт интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Все авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.